

Plante & Cité – Le Grand Lyon

SCIENCIL – SYNTHÈSE THÉMATIQUE

L'eau et les transferts hydriques

août 2013

Sommaire

INTRODUCTION	3
I. FACTEURS DE L'ALIMENTATION HYDRIQUE EN MILIEU URBAIN	5
I.1 FACTEURS AGRO-PEDOLOGIQUES :	5
I.2 LES FACTEURS DE LA DEMANDE CLIMATIQUE :	6
II. METHODES D'ETUDES	6
II.1 LE SITE D'OBSERVATION	6
II.2 LE MATERIEL VEGETAL	7
II.3 LES FOSSES DE PLANTATION	7
II.4 PARAMETRES ET OUTILS DE MESURES	8
II.4.1 POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL.....	8
II.4.2 POTENTIEL HYDRIQUE FOLIAIRE.....	10
II.4.3 VARIATIONS MICROMETRIQUES DU DIAMETRE DES TRONCS, DES CHARPENTIERES ET DES RAMEAUX.	11
II.4.4 TEMPERATURE DE LA SURFACE DES FEUILLES	11
II.5 EXPLOITATION ET PRESENTATION DES RESULTATS	12
III. CARACTERISATION DE L'ETAT HYDRIQUE DU SOL ET DES ARBRES JUSTE APRES LA PLANTATION	13
III.1 ETAT HYDRIQUE DU SOL	13
III.2 ETAT HYDRIQUE DE L'ARBRE	14
III.3 VARIATIONS MICROMORPHOMETRIQUES DES RAMEAUX	15
III.4 ETAT THERMIQUE FOLIAIRE	16
III.5 BILAN ET PERSPECTIVES DES METHODES DE MESURE	17
IV. EFFETS DES TECHNIQUES CULTURALES SUR L'ETAT HYDRIQUE DU SOL ET DES ARBRES PLANTES.	18
IV.1 EFFET DE LA PERIODE DE PLANTATION	18
IV.1.1 EVOLUTION DES VALEURS TENSIOMETRIQUES EN FONCTION DE LA PERIODE DE PLANTATION.....	18
IV.1.2 EVOLUTION DES POTENTIELS HYDRIQUES FOLIAIRES EN FONCTION DE LA PERIODE DE PLANTATION ...	18
IV.2 EFFETS DE LA FORCE DE PLANTATION	19
IV.2.1 EVOLUTION DES VALEURS TENSIOMETRIQUES EN FONCTION DE LA FORCE DE PLANTATION.....	19
IV.2.2 EVOLUTION DES POTENTIELS HYDRIQUES FOLIAIRES EN FONCTION DE LA FORCE DE PLANTATION.....	20
IV.2.3 VARIATIONS DENDROMETRIQUES EN FONCTION DE LA FORCE DE PLANTATION.....	21

IV.3	EFFETS DES IRRIGATIONS	21
IV.3.1	EFFETS DES IRRIGATIONS SELON LA DATE DE PLANTATION	21
IV.3.2	EFFETS DES IRRIGATIONS SELON LA FORCE DE PLANTATION	23
V.	APPLICATIONS A LA CONDUITE DE L'ARROSAGE	24
V.1.1	ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES	24
V.1.2	APPLICATIONS AU SUIVI DE L'ARROSAGE ET DE L'ENRACINEMENT	27
VI.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	28
VII.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	30

Contexte

Le développement de plus en plus important des aménagements paysagers pose le problème de la maîtrise des techniques de réalisation et de suivi des plantations dans une perspective de pérennité. Les outils et les méthodes manquent pour accompagner les professionnels dans leurs interventions.

Les études et observations menées dans le cadre de Sciencil tentent d'apporter des éléments de réponses à cette attente des professionnels. L'objectif de la démarche est de faire évoluer les pratiques actuelles sur des bases scientifiques.

Les études des relations hydriques entre le sol, la plante et l'atmosphère constituent l'un des axes d'investigations entrepris par Sciencil. Elles sont menées en synergie avec celles entreprises sur les sols de plantation et celles sur la morphologie et l'architecture des arbres. Le site commun de ces études est celui de la Cité Internationale de Lyon. Il constitue un site intéressant d'observations par ses innovations en matière de reconstitution des sols et par la diversité d'espèces, de dates et de forces de plantation des arbres transplantés.

Les études des transferts hydriques dans le cadre de Sciencil présentent un double intérêt lié d'une part à l'importance capitale de l'eau pour la réussite des plantations en milieu urbain, d'autre part aux manques de références scientifiques et techniques relatives à l'utilisation et à la gestion de l'eau dans le secteur des espaces verts.

Les objectifs spécifiques sont la mise au point d'outils et de méthodes permettant d'évaluer, de comprendre et de maîtriser les apports d'eau nécessaires à la bonne reprise des plantations pendant les phases de parachèvement et de confortement.

Les premières études de caractérisation hydrique réalisées ont donné lieu en 1995 à deux mémoires d'étudiants destinés à élaborer de nouvelles méthodologies :

- *pour caractériser la circulation de l'eau à travers le système anthrosol-motte-arbre (A.MAAROUF, 1995);*
- *pour définir des critères simples morphologiques et fonctionnels permettant de juger de la récupération d'un certain équilibre de développement des arbres transplantés (J.FILOQUE, 1995);*

En 1996 s'est achevée la première phase du projet SCIENCIL par une synthèse des résultats des différents thèmes (S. BARRE, 1996) et par la rédaction d'un mémoire de fin d'études afin d'affiner la caractérisation de la circulation de l'eau à travers le système sol-motte-plante-atmosphère, et de juger de la fiabilité des outils pour la maîtrise des irrigations (A. DELCAMBRE, 1996).

La deuxième phase du projet SCIENCIL correspond au suivi, à partir des méthodologies définies dans les mémoires antérieurs, du bon développement des arbres et de la fertilité des sols. Elle a donné lieu à un mémoire de fin d'études (O. MADELAINE, 1997) dont l'objectif est de suivre les transferts hydriques dans la fosse de plantation en liaison avec l'état hydrique de l'arbre et son développement à l'aide des mêmes outils qu'en 1996.

Cette note de synthèse est destinée à rassembler les principaux résultats des expérimentations et investigations conduites dans le cadre de Sciencil pendant la période de 1995 à 1997. Il s'agit de capitaliser les connaissances acquises au cours de ces premières années d'étude.

Le rappel des données de bases et du contexte des études constitue la première partie de cette note. La deuxième partie est consacrée aux matériels et méthodes utilisés pour la conduite des différentes expérimentations. La troisième partie traite les applications pratiques et les transferts de connaissances dans une perspective de pérennisation des végétaux et de meilleure utilisation de la ressource en eau.

I. Facteurs de l'alimentation hydrique en milieu urbain

Les plantes des espaces verts vivent dans un environnement qui leur est imposé et qui est différent de leur écosystème naturel. Les facteurs de ce milieu, aussi bien édaphiques que climatiques, perturbent le fonctionnement hydrique de ces végétaux.

1.1 Facteurs agro-pédologiques :

Les sols urbains sont souvent des sols reconstitués sur une faible épaisseur. Leur rôle de réservoir en eau se trouve réduit d'autant plus que leur fertilité physique et chimique est altérée par les opérations de reconstitution. Le compactage lors de la mise en œuvre réduit considérablement leur capacité de rétention en eau.

Le cas des végétaux transplantés tels que les arbres est accentué par une insuffisance de leur capacité d'absorption racinaire :

L'arbre transplanté en milieu urbain subit un déséquilibre entre sa faible capacité d'absorption racinaire et la transpiration car il perd en pépinière près de 70% de son système racinaire à l'arrachage.

Le chevelu racinaire présent dans la motte doit donc assurer seul l'absorption après transplantation. La condition de réussite de la reprise réside dans la formation rapide de nombreuses racines absorbantes hors de la motte pour augmenter la surface d'échange hydrique avec le milieu.

Le volume de sol offert est souvent limité en largeur par l'emprise des voies et des réseaux. Les arbres transplantés se développent généralement dans un volume de sol réduit de (1 à 10 m³). Il est souvent délimité par des bords compactés et imperméables, qui contraignent la croissance racinaire. En profondeur, la qualité du remblai est très éloignée des caractéristiques de la roche mère du milieu naturel.

Les propriétés hydrodynamiques du sol sont contraignantes (déstructuration, compactage, faible conductivité hydraulique, ruissellement),

- L'eau infiltrée peut être également de mauvaise qualité (eaux polluées ou trop chargées en éléments minéraux pouvant diminuer la disponibilité en eau pour les racines).
- L'application de sels de déneigement sur la voirie constitue également une cause importante de dépérissement des arbres.
- Les précipitations, qui permettent un réapprovisionnement des réserves en eau du sol sont inégalement réparties en ville. De plus, l'eau de pluie a un pH acide (NB les sols urbains sont plutôt basiques) et est chargée de polluants aériens.

1.2 Les facteurs de la demande climatique :

Le climat urbain diffère de celui du milieu rural ou forestier. Ces différences agissent sur les mouvements de l'eau dans la plante, notamment sur la transpiration.

Outre la réserve en eau disponible du sol, l'humidité de l'air, la température, le vent, le rayonnement solaire et la qualité de l'air agissent directement ou indirectement sur la transpiration et par conséquent sur la photosynthèse.

L'activité photosynthétique est assurée par l'ouverture des stomates. Or, la régulation stomatique est tributaire des conditions de milieu. En milieu urbain, les conditions environnementales telles que des températures plus élevées, des vents asséchants, la pollution de l'air peuvent augmenter le pouvoir évaporant des feuilles et engendrer plus de dépenses en eau et conduire à la fermeture des stomates.

Le déséquilibre entre l'absorption et la transpiration se traduit rapidement par l'apparition de stress qui retarde la régénération racinaire et la reprise de la croissance aérienne.

Pour compenser cette perte en eau, les fosses de plantation doivent être dimensionnées en fonction des besoins de l'arbre.

II. Méthodes d'études

II.1 Le site d'observation

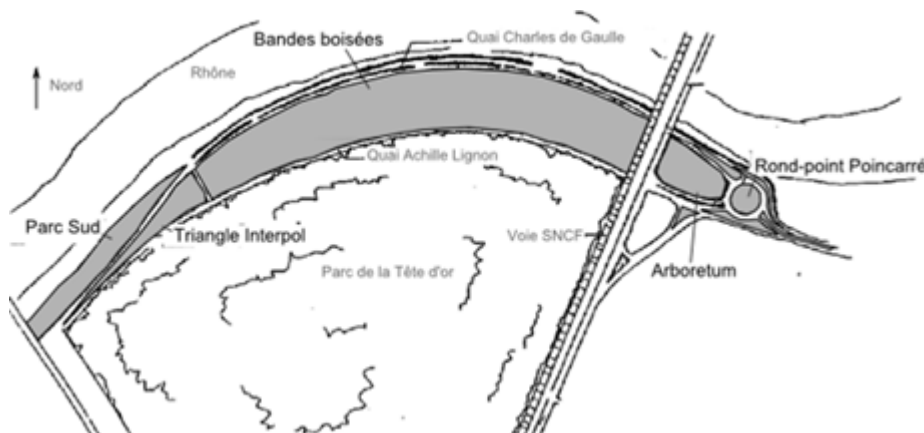


Figure 1 : Plan de repérage des 5 secteurs composant le périmètre d'étude de SCIENCIL (source Sol Paysage)

Le site d'étude est celui de la Cité Internationale de Lyon situé entre le Parc de la Tête d'or et les berges du Rhône.

Les conditions de ce site sont proches de celles d'un milieu périurbain. C'est une zone cernée par de nombreuses routes où la circulation est très importante. Elle est exposée à une pollution atmosphérique intense aux heures de pointe.

Le site est composé de cinq secteurs :

- Le Quai Charles de Gaulle,

- Le Rond point Poincaré,
- L'Arboretum.
- Le triangle Interpol
- le Parc Sud

II.2 Le matériel végétal

L'espèce retenue pour les études des relations hydriques est le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana*), composant l'alignement du Quai Charles de Gaulle.

Cette espèce, originaire des marécages des Etats Unis, présente des aptitudes à supporter l'excès d'eau. Elle serait également moins sensible au manque d'eau que le frêne commun.

En l'absence d'irrigation, les forestiers ne plantent de frênes qu'au bord de l'eau ou dans des zones favorables à la collecte des eaux pluviales.

En milieu urbain, le problème se pose différemment : il fait plus chaud et l'arbre ne dispose pas d'un volume de sol suffisant pour avoir les ressources hydriques nécessaires. Il faut donc envisager un système d'irrigation permettant une alimentation régulière pendant les étés des 3 ou 4 premières années qui suivent sa plantation.

Le matériel végétal initial planté en 1994-95 est un alignement de 248 frênes situé le long du **Quai Charles de Gaulle**. Ces arbres n'ont pas été contreplantés en pépinière et sont transplantés à 8 ans en force de plantation 25/30. L'arbre N°67 planté en avril 1994 est choisi pour représenter cet alignement.

En avril 1996, six frênes américains de l'**Arboretum** sont transplantés. Ils présentent trois forces différentes de plantation. 2 de force 20/25, 2 de force 15/20 et 2 de force 10/15. Les six arbres sont choisis pour les effets de la force de plantation sur l'état hydrique global et sur la reprise racinaire.

Les arbres du Rond point sont plantés en force 25/30 selon deux dates : avril 1994 et novembre 1994. Quatre sujets sont retenus pour étudier l'effet de la date de plantation sur l'état hydrique global et sur la reprise racinaire.

NB. L'équipement important en sondes tensiométriques nécessaire pour chaque arbre explique le nombre limité d'arbres équipés

II.3 Les fosses de plantation

Les sols des différents secteurs du site sont entièrement reconstitués (voir fiche sol). Les fosses de plantation sont recouvertes d'une couche de 5 à 10 cm de pouzzolane de granulométrie moyenne (8-15mm) qui constitue un mulch minéral limitant fortement l'évaporation. Les adventices pouvant concurrencer les arbres sont arrachés. Ainsi les pertes d'eau du sol seront dues à l'absorption racinaire ou à un drainage profond non quantifiable.

Pour les arbres du boulevard urbain (quai CDG), la mise en place du sol reconstitué est faite en 1994. Chaque fosse de plantation représente un volume d'environ 10 m³ pour une profondeur moyenne de 80 cm,

Pour les arbres de l'arboretum, la mise en place et la plantation sont réalisées en avril 96. Le volume de chaque fosse est de 6 m³ environ pour une profondeur moyenne de 90 cm.

II.4 Paramètres et outils de mesures

Les méthodes décrites ci-après sont couramment utilisées au cours d'études sur l'état hydrique des végétaux et des sols (arboriculture urbaine et fruitière par exemple)

II.4.1 Potentiel hydrique du sol

Le potentiel hydrique ψ correspond au travail à appliquer à une unité de masse d'eau d'un point du système pour l'amener de l'état liée à l'état libre à la même température et à la même pression (CRUIZIAT et TYREE, 1990). Il correspond aussi au degré de liaison de l'eau avec les constituants du sol (BORDES, 1993).

La mesure du potentiel hydrique du sol a été choisie en 1994 car elle était plus facile que celle de la teneur en eau. L'outil de mesure de ce paramètre est la sonde tensiométrique de type WATERMARK® (Figure 2).



Figure 2 : Sonde Watermark

Celle-ci convertit les variations de la résistivité électrique dans une sonde poreuse en fonction de l'humidité du milieu qui l'entoure, en une valeur très proche du potentiel hydrique exprimé en centibar (ou kiloPascal « KPa »). La gamme de mesure est de 0 à -200 centibars allant ainsi de la saturation en eau jusqu'à l'humidité correspondant au pF 3,3. L'humidité à la capacité au champ correspond approximativement à pF 2 (-10 centibars).

Les mesures sont obtenues manuellement à l'aide d'un boîtier digital de lecture (Figure 3).



Figure 3 : Boîtier Watermark

Le dispositif tensiométrique mis en place est illustré ci-après : (schéma en Figure 4) ; il cherche à échantillonner le volume de sol le plus régulièrement possible.

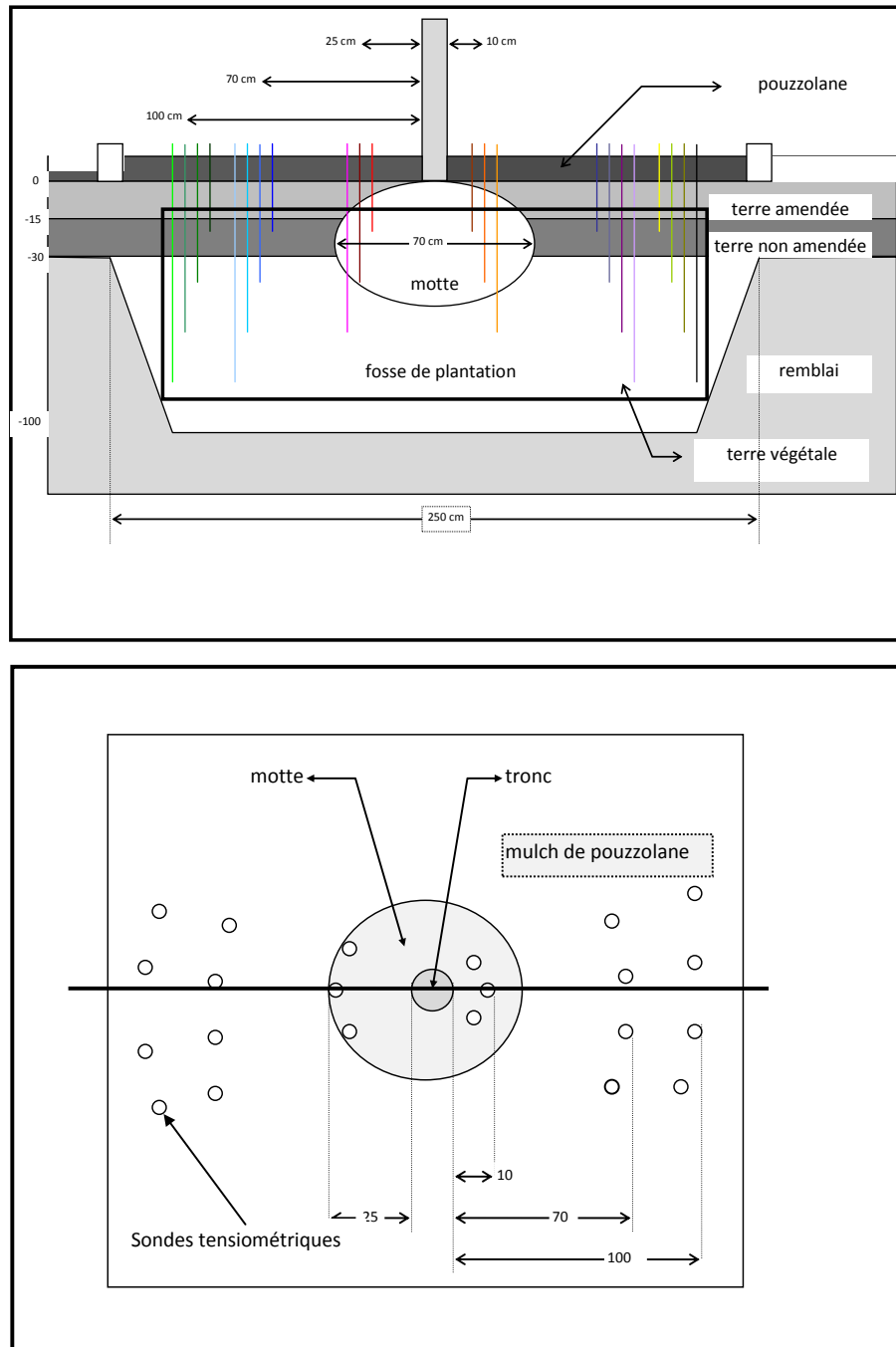


Figure 4 : Dispositif tensiométrique

Chaque arbre est équipé de 22 sondes réparties selon les coordonnées suivantes. Les positions ont été définies et retenues après discussion en consortium :

- une première rangée de 3 sondes situées à 10-15 cm d'un côté du tronc et à 20-25 cm du tronc de l'autre côté, placées à 20, 40, 60 cm de profondeur (soit 6 sondes).

- une deuxième rangée de 4 sondes situées à 70 cm de chaque côté du tronc, placées à 20, 40, 60, 80 cm de profondeur (soit 8 sondes).
- une troisième rangée de 4 sondes situées à 100 cm de chaque côté du tronc, placées à 20, 40, 60, 80 cm de profondeur (soit 8 sondes).

Les relevés tensiométriques sont effectués de mai à septembre, 2 à 3 fois par semaine pendant les trois saisons de l'étude (1995 – 1996 - 1997).

Avertissement : Attention, les potentiels hydriques doivent toujours être exprimés en valeur négative. Il s'agit d'une dépression.

Il arrive dans cette fiche que dans les graphiques présentés dans la partie résultats, les valeurs soient parfois données en valeur absolue et non en valeur exacte négative.

II.4.2 Potentiel hydrique foliaire

Comme pour le sol, on peut utiliser le potentiel hydrique de l'arbre pour quantifier l'état énergétique de l'eau dans la plante. Ce paramètre permet d'estimer si elle se trouve en confort ou en stress hydrique (état physiologique anormal créé soit par un déficit soit par un excès d'eau).

La mesure du potentiel hydrique réalisée juste avant le lever du jour correspond au **potentiel hydrique foliaire de base**. Théoriquement, cette grandeur traduit le potentiel d'équilibre avec le potentiel hydrique du sol. La mesure du potentiel hydrique foliaire réalisée entre 14h et 16h correspond au potentiel hydrique foliaire maximum.

Les mesures de potentiel hydrique foliaire sont réalisées à l'aide de la chambre à pression de Scholander (Figure 5).



Figure 5 : Chambre de Scholander

Les déterminations sont réalisées sur les trois folioles terminales de la feuille de frêne (la feuille entière étant trop grande). On admet que le potentiel hydrique est à peu près identique dans toute la feuille. La mesure est répétée jusqu'à ce qu'on obtienne 2 valeurs consécutives très proches (en moyenne 2 à 5 mesures suffisent). On prélève le minimum de feuilles pour ne pas nuire aux arbres.

Les prélèvements sont faits sur les arbres équipés de sondes tensiométriques de manière à déterminer l'influence du dessèchement du sol et des apports d'eau (soit une fois par semaine en moyenne de juillet à mi-août) sur l'état hydrique de l'arbre.

II.4.3 Variations micrométriques du diamètre des troncs, des charpentières et des rameaux.

Les mesures horaires ou à la minute des variations diamétriques de très faible amplitude sur les tiges des arbres permettent de suivre les contractions induites en fonction de la demande climatique et de la disponibilité en eau. Lorsque la transpiration est plus forte que l'absorption, les tissus perdent de l'eau et leur croissance en diamètre diminue. A l'inverse, lorsqu'il y a suffisamment d'eau, l'arbre reconstitue alors ses réserves hydriques et la croissance en diamètre de ses organes lignifiés augmente.

La mesure est réalisée à l'aide d'un dendromètre. Celui-ci est constitué d'un porte-capteur fixé à l'arbre (rameaux ou charpentières) et un capteur de déplacement ENERTEC-SCHLUMBERGER (Figure 6). Une tige de fer doux collée par une extrémité sur l'écorce, coulisse à l'intérieur d'un solénoïde contenu par le capteur. Ce déplacement crée un courant induit (proportionnel au déplacement) mesuré par une centrale d'acquisition de marque PEPISTA 3000. La centrale comporte un module avec 8 entrées pour capteurs.



Figure 6 : Capteur PEPISTA

La précision de la mesure est de l'ordre du centième de millimètre.

Les arbres équipés sont parmi ceux retenus pour les mesures de potentiel hydrique :

- 2 frênes du Rond Point Carré plantés respectivement en avril 94 et novembre 94,
- 6 frênes américains de l'arboretum plantés en avril 96, présentant 3 forces de plantation :
 - 10/15 cm pour les arbres 3 et 4
 - 15/20 cm pour les arbres 5 et 6
 - 20/25 cm pour les arbres 1 et 2

Les capteurs sont placés sur les troncs et sur les charpentières.

La fréquence des mesures varie de 15 minutes à une heure.

II.4.4 Température de la surface des feuilles

L'écart entre la température de surface du couvert végétal des arbres et la température de l'air ambiant est proportionnel à l'évapotranspiration. En cas de déficit hydrique, l'arbre réduit son évapotranspiration, ce qui se traduit par une augmentation de la température de surface qui devient supérieure à celle de l'air.

La mesure est réalisée à l'aide d'un radiothermomètre infrarouge portable (modèle Agritherm 112BL/112.2L, voir en Figure 7).



Figure 7 : Pistolet infra-rouge

Cet appareil présente les spécificités suivantes :

- Une gamme de température de -30°C à 100°C ,
- Une résolution de $0,1^{\circ}\text{C}$ en instantané,
- Un temps de réponse inférieur à $0,5\text{s}$,
- Un angle de visée de 4° ,
- Une gamme d'émissivité réglable de $0,01$ à $0,999$ (pas d'unité),
- Une largeur de spectre utilisé de 4 à 14 microns,
- Une précision de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Les mesures sont effectuées de 13 h à 16h sur les frênes du Rond Point. Pour chaque arbre, les relevés concernent 2 feuilles portées par un même rameau. On détermine à l'aide d'une caméra à infrarouge le secteur de l'arbre le plus chaud. On choisit ensuite le rameau de ce secteur le mieux exposé au soleil. Pour chacune des 2 feuilles retenues, on procède à 3 mesures correspondant aux folioles terminales, latérale 1 et latérale 2.

II.5 Exploitation et présentation des résultats

Tous les résultats sont présentés sous forme de courbes dont l'abscisse est une date de mesure et l'ordonnée la valeur de la variable mesurée.

Certains résultats tensiométriques sont traités à l'aide du logiciel Surfer. Pour une bonne compréhension des transferts hydriques dans le sol, le logiciel permet de visualiser, sous la forme de courbes isopotentielles, les variations de potentiel existant dans un plan de la fosse de plantation. Une séquence composée de plusieurs cartes permet de représenter l'évolution dans le temps de ces variations spatiales.

III. Caractérisation de l'état hydrique du sol et des arbres juste après la plantation

L'étude de la crise de transplantation par un suivi de l'état hydrique du sol et de l'arbre est essentielle pour juger de la rapidité de la reprise racinaire. Celle-ci est conditionnée par la sortie des racines de la motte de transplantation et leur mode de colonisation du sol adjacent. La caractérisation hydrique de la crise de transplantation est réalisée en 1995 (Abla Maarouf, 1995) sur des frênes du Quai Charles de Gaulle plantés en novembre 1994.

L'état hydrique des arbres est évalué par la mesure du potentiel hydrique foliaire.

III.1 Etat hydrique du sol

Pendant la première saison de végétation qui suit la plantation, la terre de la motte se dessèche plus rapidement que les autres zones de la fosse de plantation (Figure 8). On considère que juste après la transplantation, l'activité racinaire est totalement localisée au niveau de la motte. L'arrosage de celle-ci est alors nécessaire dès la reprise de végétation, au moment du débourrement et de l'épanouissement des feuilles. La réhumectation se réalise mieux et de façon homogène par un apport manuel d'eau dans une cuvette profilée au dessus de la motte.

Le dessèchement du sol de la fosse de plantation à proximité de la motte est progressif. Il est généralement initié pendant la période de forte végétation, à partir du mois de juin. Cette date marque le début de la sortie des racines de la motte vers le sol. L'assèchement progressif qui s'en suit témoigne de la progression du front racinaire dans la fosse de plantation. L'augmentation parallèle des tensions enregistrées (attention, en valeur absolue, car une tension est négative en principe) à des profondeurs différentes (20, 40, 60 et 80cm) montrent que la colonisation se fait à la fois latéralement dans la terre de plantation criblée et amendée, et en profondeur vers la terre brute non amendée.

L'humidité du sol de la fosse de plantation au delà d'un mètre du tronc reste élevée, proche de la capacité au champ pendant la première année après la plantation. Les sondes placées dans cette zone ont enregistré des valeurs tensiométriques constantes très proches de 0 (proche de la capacité au champ). Les racines n'ont pas encore atteint cet endroit de la fosse.

Les résultats tensiométriques sont identiques de part et d'autre du tronc. Ceci laisse supposer que la colonisation de la fosse par les racines se fait de façon symétrique.

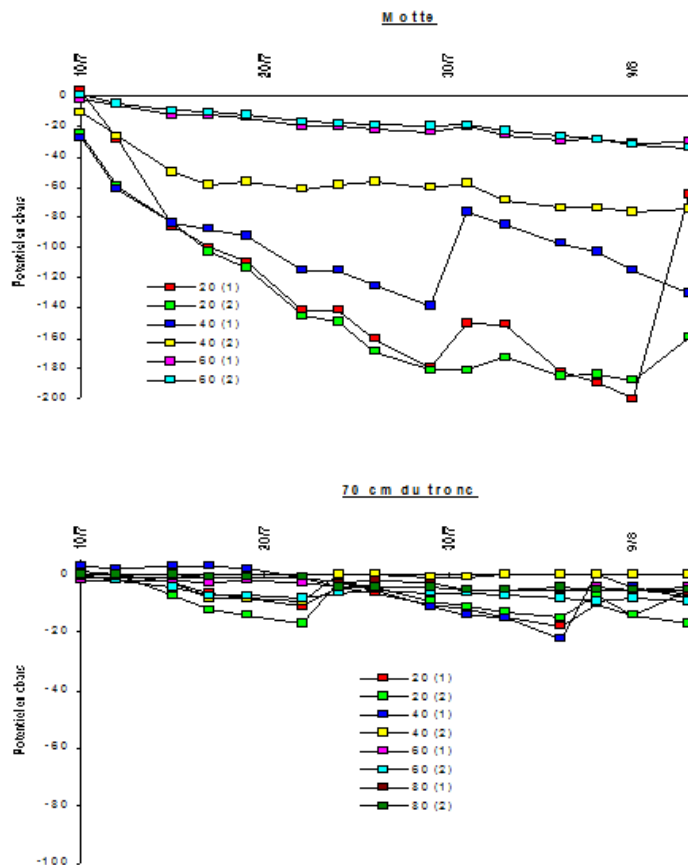


Figure 8 : Exemples de relevés tensiométriques dans la motte et à 70 cm du tronc

III.2 Etat hydrique de l'arbre

Le potentiel hydrique de base (mesuré au lever du jour) est plus fiable que le potentiel hydrique foliaire (mesuré pendant la journée) pour rendre compte de l'état de stress hydrique de l'arbre.

Les valeurs sont comprises entre -3.5 et -20 bars. Les variations sont essentiellement dues au cycle de réhumectation par des apports d'eau et de dessiccation l'absorption d'eau des racines qui progressent dans la fosse par progression racinaire et par la demande climatique. Pour les arbres nouvellement plantés, cette évolution du potentiel hydrique de base en fonction des irrigations est parallèle à celle du potentiel hydrique du sol de la motte.

Pendant la période de forte végétation (juin 95), les arbres qui sont à leur première saison après la plantation manifestent un état hydrique relativement contraignant (potentiel hydrique de base voisin de -20 bars). La concentration de l'activité racinaire dans la motte et l'augmentation de la surface transpirante sont les causes de cet état hydrique.

III.3 Variations micromorphométriques des rameaux

En 1995, J. Filoque a défini un rameau de référence susceptible de traduire et de représenter l'état hydrique et de croissance de l'arbre. Afin de justifier le choix de cette hypothèse, il a disposé des capteurs du système Pépista sur 2 arbres (44 et 52) et a suivi les variations micrométriques du diamètre de ces rameaux (pousses de l'année précédente 1993). L'amplitude de ces variations de diamètre semble être un bon indicateur de l'état hydrique de l'arbre dans son ensemble. Cette étude est poursuivie dans les mêmes conditions expérimentales pour tester la validité de la méthode proposée. Rappelons que les critères de définition du rameau de référence sont basés sur une analyse morphologique. Ils sont détaillés dans le mémoire de fin d'études de J. Filoque (1995).

Les mesures sont enregistrées toutes les heures par la centrale d'acquisition des données Pépista (Figure 9).

Après une période prolongée de déficit hydrique climatique, le diamètre de tous les rameaux décroît. Cette décroissance s'accompagne d'une forte amplitude de contraction. Le manque d'eau conduit à une déshydratation des organes provoquant une diminution progressive des amplitudes des contractions.

Un apport d'eau se traduit par une augmentation immédiate du diamètre de tous les rameaux. Si cet apport reste ponctuel, la croissance s'arrête rapidement. S'il est suffisant et fractionné, la croissance se poursuit et les contractions journalières tendent à redevenir normales. L'étude de l'évolution des variations micrométriques en fonction de la contrainte hydrique permet de situer l'alternance des périodes de faible croissance et les périodes de croissance ralentie. La réaction des rameaux suite à une irrigation importante après un stress hydrique prolongé, se traduit par une très forte croissance et une absence de contractions le jour de l'intervention. Le jour suivant, les amplitudes des contractions augmentent et la croissance s'arrête avant de reprendre normalement ensuite. Si les apports d'eau sont réguliers les rameaux ayant subi un stress hydrique, peuvent récupérer leur retard de croissance.

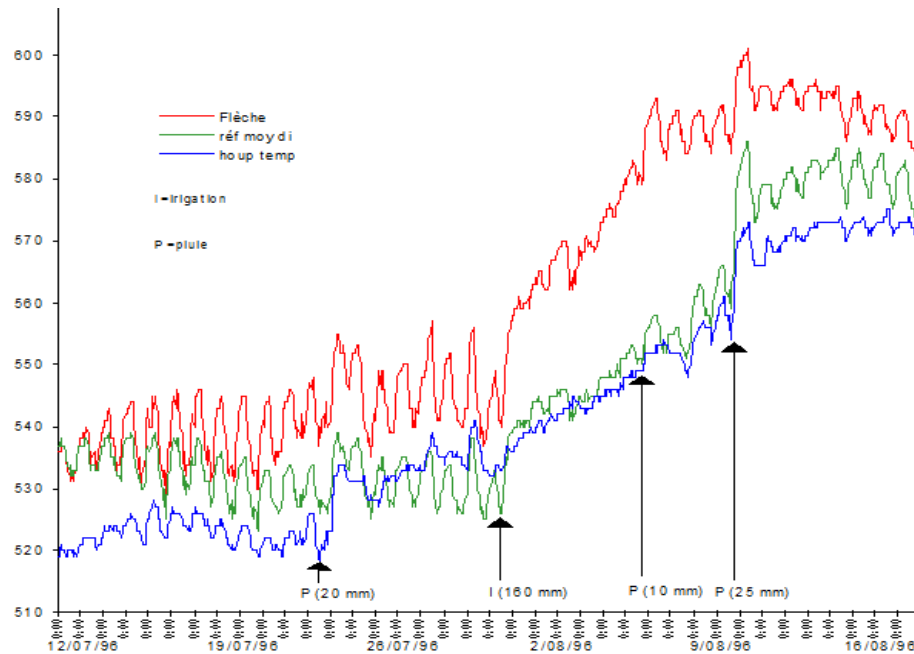


Figure 9 : Variations micromorphométriques des diamètres des rameaux de l'arbre 44 planté en novembre 1994

III.4 Etat thermique foliaire

Dans le cas d'un stress hydrique, l'évapotranspiration de l'arbre étant réduite, la température de surface devient supérieure à la température ambiante. C'est cet écart qui est recherché pour déterminer les seuils thermiques de stress hydrique.

Les premiers résultats des mesures de la température de surface des feuilles par radiothermom trie ont permis de localiser la partie de l'arbre la plus chaude. Cette partie, située au milieu de l'arbre à environ 4 mètres de haut, serait la plus sensible aux variations de la disponibilité en eau dans le sol.

Le protocole retenu est de 6 mesures par arbre réalisées deux fois par jour. Sur la partie la plus chaude, un rameau situé de préférence à l'extérieur et bien exposé est choisi. Deux feuilles de ce rameau sont ensuite sélectionnées. Les mesures sont réalisées sur les folioles, terminales, médianes et basales de chaque feuille.

Les résultats de cette méthode ne sont pas concluants (Figure 10). Le protocole semble difficile à mettre en œuvre dans les conditions réelles. La prise de mesure dépend principalement des conditions extérieures (rayonnement, vitesse du vent, etc.). Il existe une variabilité au sein de chaque arbre et pour des relevés espacés de quelques minutes seulement. Cependant, globalement, la température de la surface des folioles est toujours supérieure à la température ambiante. Les écarts semblent dépendre de la durée entre deux d'irrigation. Pour un arbre normalement arrosé, l'écart moyen est d'environ 2 C. Pour un arbre soumis à un arrêt prolongé de l'arrosage, cet écart est de 7 C. On ne dispose pas de référence chez les ligneux pour interpréter cette différence en terme d'intensité de stress hydrique.

Arbre 42 transplanté en novembre 94 (Irrigation le 17/07/96)

Date : 01/08/96		Heure	Tf	Ta	Ta (hum)	HR	R inci	R réf
Feuille 1	Foliole terminale	13h09	37,4	30,6	14,5	37,9	435	170
	Foliole central	13h11	34,6	30,6	14	35,6	234	185
	Foliole bas	13h14	43,7	34,3	16,8	34,2	921	202
Feuille 2	Foliole terminale	13h21	40,6	33,3	16,5	35,8	601	192
	Foliole central	13h16	37,8	34	17	35,9	885	181
	Foliole bas	13h18	42,2	31,1	15,1	34,1	809	190

Arbre 52 transplanté en avril 94 (Irrigation le 31/07/96)

Date : 01/08/96		Heure	Tf	Ta	Ta (hum)	HR	R inci	R réf
Feuille 1	Foliole terminale	14h35	27,1	33,7	14,2	32,2	936	150
	Foliole central	14h37	36,9	37,1	14,6	27,4	912	147
	Foliole bas	14h39	37,7	34,3	14	29,9	940	143
Feuille 2	Foliole terminale	14h40	33,5	33,9	13,6	29,2	590	185
	Foliole central	14h42	37,4	34,4	15	31,9	824	184
	Foliole bas	14h44	31,8	33,4	14,5	32,2	782	158

Figure 10 Evolution des températures foliaires

III.5 Bilan et perspectives des méthodes de mesure

Les méthodes de mesure mises en œuvre dans le cadre de Sciencil ont permis de montrer la pertinence de l'outil tensiométrique pour évaluer sur le plan hydrique l'intensité de la crise de transplantation.

Les mesures tensiométriques du potentiel hydrique du sol permettent de déterminer les zones d'assèchement et d'humectation de la fosse de plantation et d'en déduire la progression racinaire.

Généralement, on considère qu'une augmentation des tensions enregistrées par les sondes placées dans le sol près de la motte est le fait de la consommation d'eau par les racines présentes à cet endroit.

La mesure de potentiel hydrique foliaire de base est également un bon indicateur de l'état hydrique de l'arbre. Son application reste néanmoins contraignante : la mesure doit être réalisée in situ au lever du jour avec un appareillage lourd (Chambre de Scholander, loupe binoculaire, etc.).

Bien que prometteuses pour détecter les situations de stress hydrique des arbres, les mesures micromorphométriques présentent certaines limites de représentativité liées à l'organe équipé et aux perturbations dues à l'humidité du tronc. L'amplitude des contractions serait sensible aux variations d'humidité de l'atmosphère.

Les mesures thermométriques des feuilles n'ont pas été concluantes en raison de l'influence directe de paramètres climatiques lors de la prise des mesures.

IV. Effets des techniques culturales sur l'état hydrique du sol et des arbres plantés.

IV.1 Effet de la période de plantation

La question que se posent les aménageurs et les pépiniéristes lors de l'organisation de leurs chantiers est de savoir quel effet la période de plantation peut-elle avoir sur l'état de reprise des arbres ?

Généralement, les deux périodes de plantation sont :

- **Fin de l'automne, début de l'hiver (arbres plantés en novembre),**
- **Fin de l'hiver, début du printemps (arbres plantés en mars-avril)**

IV.1.1 Evolution des valeurs tensiométriques en fonction de la période de plantation

Pour la même force (25/30) et après une année de végétation, l'arbre planté en avril 94 a enregistré des valeurs tensiométriques et des potentiels hydriques foliaires relativement bas par rapport à celui planté fin automne-début hiver (novembre 94). Ce résultat suggère qu'une plantation au printemps aboutit à un développement racinaire important car les ressources en eau de la fosse sont utilisées plus rapidement.

La comparaison tensiométrique des arbres selon leur date de plantation est difficile à établir. Les conclusions de cette étude sont à considérer avec prudence compte tenu de la très faible représentativité et des conditions de plantation qui sont différentes pour les deux arbres étudiés.

IV.1.2 Evolution des potentiels hydriques foliaires en fonction de la période de plantation

Les potentiels hydriques foliaires de base évoluent dans le même sens que les potentiels hydriques du sol en fonction des régimes hydriques. Lorsque le sol est normalement alimenté en eau, les potentiels hydriques de base se situent entre -2.4 et -3.3 bars. Dans le cas d'une privation d'eau prolongée (arbre n°53 planté en avril 1994), le potentiel hydrique foliaire de base atteint -22.88 bars comme indiqué dans le tableau ci-après (Figure 11) :

	Novembre 94		Avril 94		
	44	42 (Irrigué)	52 (Irrigué)	53	67 (Irrigué)
Potentiels de base moyens (sur 3 � 5 mesures) en bars					
19/07/96 :	-2,43 +/- 0,36	-4,08 +/- 0,29	-3,3 +/- 0,17	-7,07 +/- 0,12	-2,42 +/- 0,33
26/07/96 :	-6,17 +/- 0,29	-7,04 +/- 0,17	-7,6 +/- 0,17	-17,67 +/- 0,29	-4,88 +/- 0,35
31/07/96 :	-8,93 +/- 0,12	-8,3 +/- 0,17	-13,28 +/- 0,83	-22,88 +/- 0,63	-9,77 +/- 0,06
02/08/96 :	-11,13 +/- 0,38	-3,35 +/- 0,38	-3,25 +/- 0,25	-4,28 +/- 4,28	-13,17 +/- 0,29
08/08/96 :	-12,06 +/- 0,29	-2,55 +/- 0,32	-2,6 +/- 0,1	-2,13 +/- 0,06	-14,3 +/- 0,17
10/08/96 :	*	-3,67 +/- 0,15	-5,55 +/- 0,3	-4,5 +/- 0,17	*
14/08/96 :	*	-2,5 +/- 0,23	-3,5 +/- 0,3	-3,6 +/- 0,19	*

(-) Les valeurs en petits caractères correspondent aux écarts types.

Figure 11 : Evolution des potentiels hydriques foliaires en fonction de la période de plantation

Comme pour les mesures tensiométriques, les arbres plantés en avril 94 enregistrent des potentiels hydriques de base légèrement plus bas que ceux plantés en novembre 94. Cependant, compte tenu de la variabilité de chaque série de mesures, les écarts entre les deux dates de plantation ne sont pas significatifs.

IV.2 Effets de la force de plantation

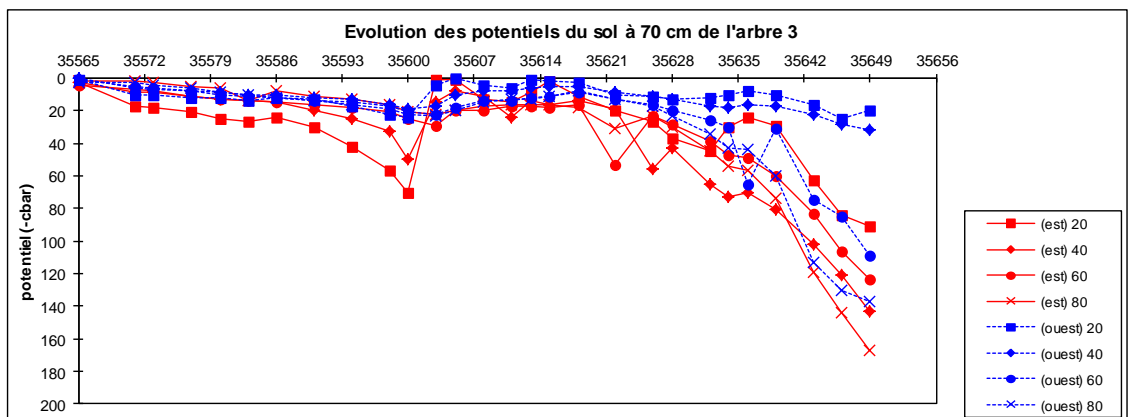
IV.2.1 Evolution des valeurs tensiométriques en fonction de la force de plantation

Les évolutions des  tats hydriques de la motte des Frênes de force 15/20 et celle des frênes de force 20/25 sont équivalentes. Pour les Frênes de force 10/15, la motte n'a pas montré de déficit hydrique particulier.

Selon les données tensiométriques, les sols et les mottes des arbres de force de plantation 10/15 subissent un dessèchement nettement inférieur à ceux des autres arbres.

Il y a peu de différence de profils hydriques entre les forces à la plantation 15/20 et 25/30 au niveau des dessèchements des sols.

Il apparaît que la force de plantation a un effet sur la vitesse de colonisation racinaire : les gros sujets épuisent plus rapidement les ressources en eau de la fosse. Leurs besoins en eau semblent plus importants et doivent être bien contrôlés pour leur éviter des situations de stress hydriques. Il faudrait donc envisager des doses d'eau plus élevées pour des forces de plantation croissantes ou faire un suivi tensiométrique plus fin (Figure 12).



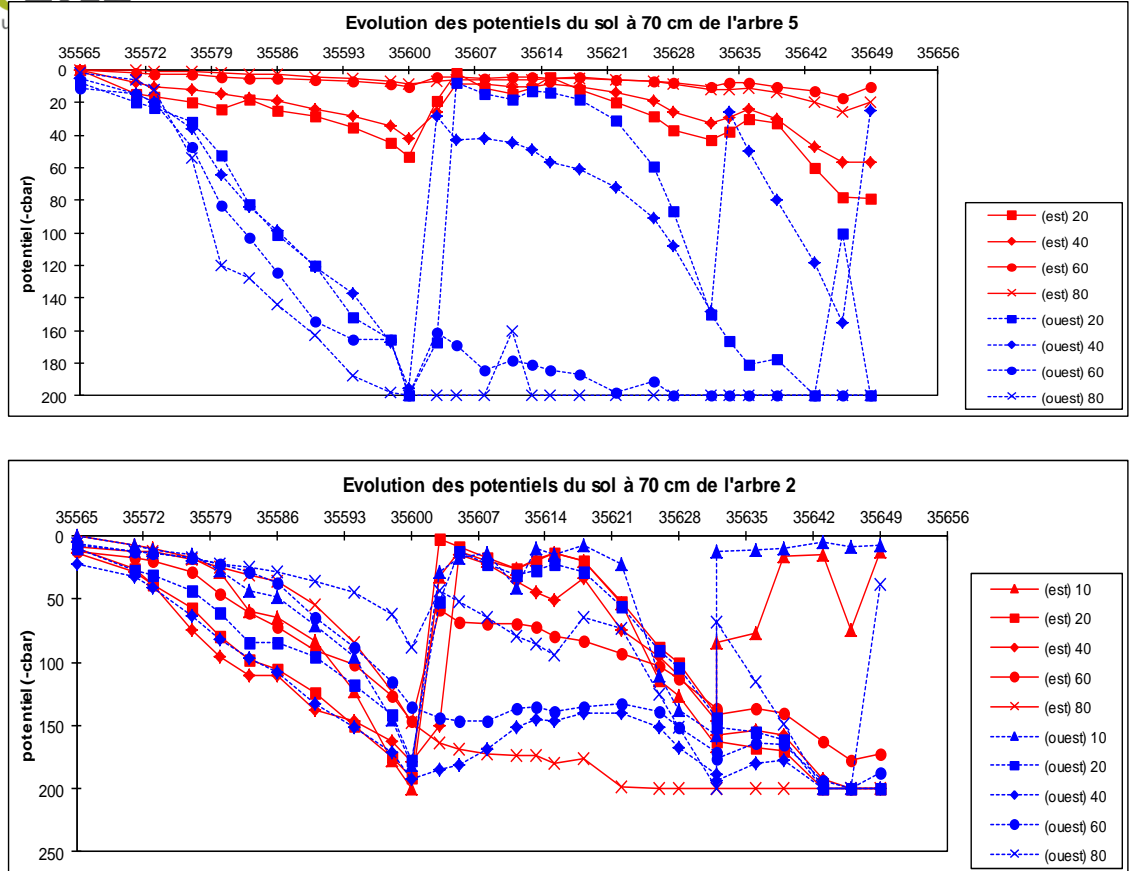


Figure 12 : Evolution des potentiels hydriques du sol en fonction de la force à la plantation : exemple, à 70 cm du tronc, d'arbres plantés en avril 1996, de forces respectivement de 10/15, 15/20, 20/25

IV.2.2 Evolution des potentiels hydriques foliaires en fonction de la force de plantation

Les potentiels hydriques foliaires de base sont, également, différents en fonction de la force de plantation (Figure 13) :

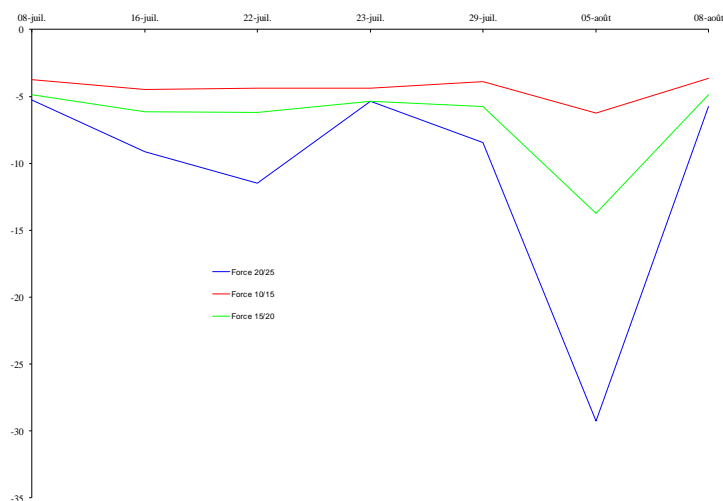


Figure 13 : Evolution des potentiels hydriques foliaires en fonction de la force à la plantation

Les arbres de force 10/15 présentent toujours des potentiels hydriques foliaires de base situé entre 0 et -5 bars. Les arbres de force supérieure dépassent systématiquement les -5 bars, et ce plus d'autant plus que la force est importante. Cette différence est en concordance avec les résultats tensiométriques où les sujets de forte force à la plantation auraient tendance à assécher davantage la fosse.

Les apports d'eau par arrosage ont toujours permis à tous les arbres de retrouver des potentiels hydriques foliaires voisins de -5 bars. Ce résultat montre qu'après un stress de forte intensité, le frêne américain est capable d'augmenter rapidement son potentiel interne suite à un apport d'eau et de se retrouver en situation proche du confort hydrique.

Comme pour le suivi tensiométrique, les mesures de potentiels hydriques foliaires montrent que plus la force de plantation est élevée, plus le stress hydrique est intense. Cependant, ces différences de comportement hydrique ne semblent pas avoir d'incidence sur la croissance en diamètre des troncs des arbres.

IV.2.3 Variations dendrométriques en fonction de la force de plantation

Globalement, les variations micrométriques des diamètres des troncs ont toutes été comparables quelque soit la force de plantation de ces arbres tous transplantés en avril 96.

Les capteurs dendrométriques placés sur les troncs (en 1997) n'ont pas permis de déceler de différences significatives en fonction de la force de plantation (Figure 14).

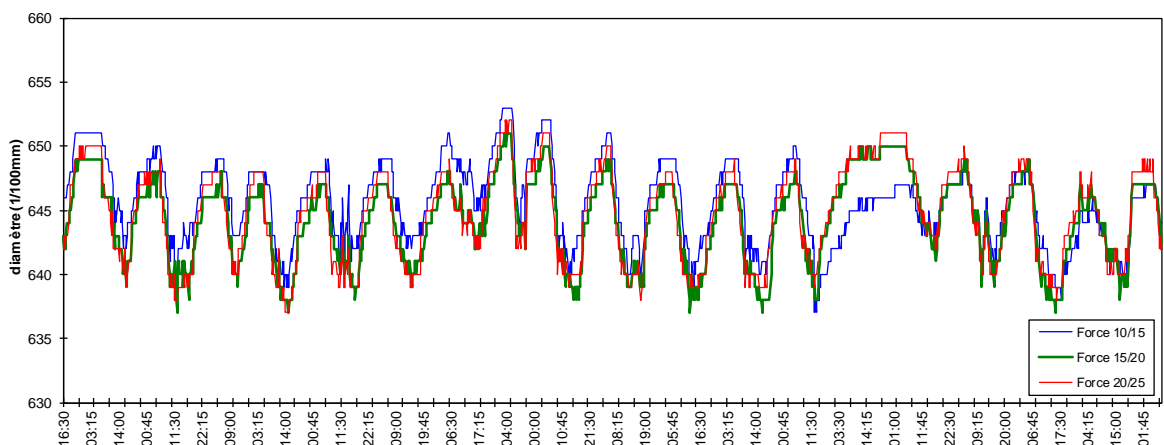


Figure 14 : Variations dendrométriques en fonction de la force à la plantation

IV.3 Effets des irrigations

L'étude porte sur le suivi et le contrôle de l'état hydrique des Frênes, plantés en 1994 et en 1996. Il s'agit de comparer le comportement hydrique de ces arbres en fonction de leur force et de leur date de transplantation. Le paramètre hydrique considéré dans cette étude est la mesure du potentiel hydrique du sol par la tensiométrie.

IV.3.1 Effets des irrigations selon la date de plantation

Les résultats tensiométriques représentés par Surfer ont permis de mettre en évidence des différences de dynamique de dessèchement des fosses selon la date de plantation. Dans les graphiques présentés, les lignes sont des lignes isopotentielles en valeur absolue. Les couleurs rouges sont à associer à la sécheresse, le bleu à l'humidité et confort hydrique.

Les arbres plantés au printemps 1994 ont des zones de dessèchements situées au delà de 80 cm du tronc et de 80 cm de profondeur tandis que ceux plantés une saison plus tard (novembre 1994) ont une zone de dessèchement qui se limite à la zone étudiée. Les premiers semblent donc prospecter les volumes de sol situés en dehors de la zone de localisation des tensiomètres tandis que les arbres plantés en novembre s'approvisionnent encore dans cette zone (Figure 15).

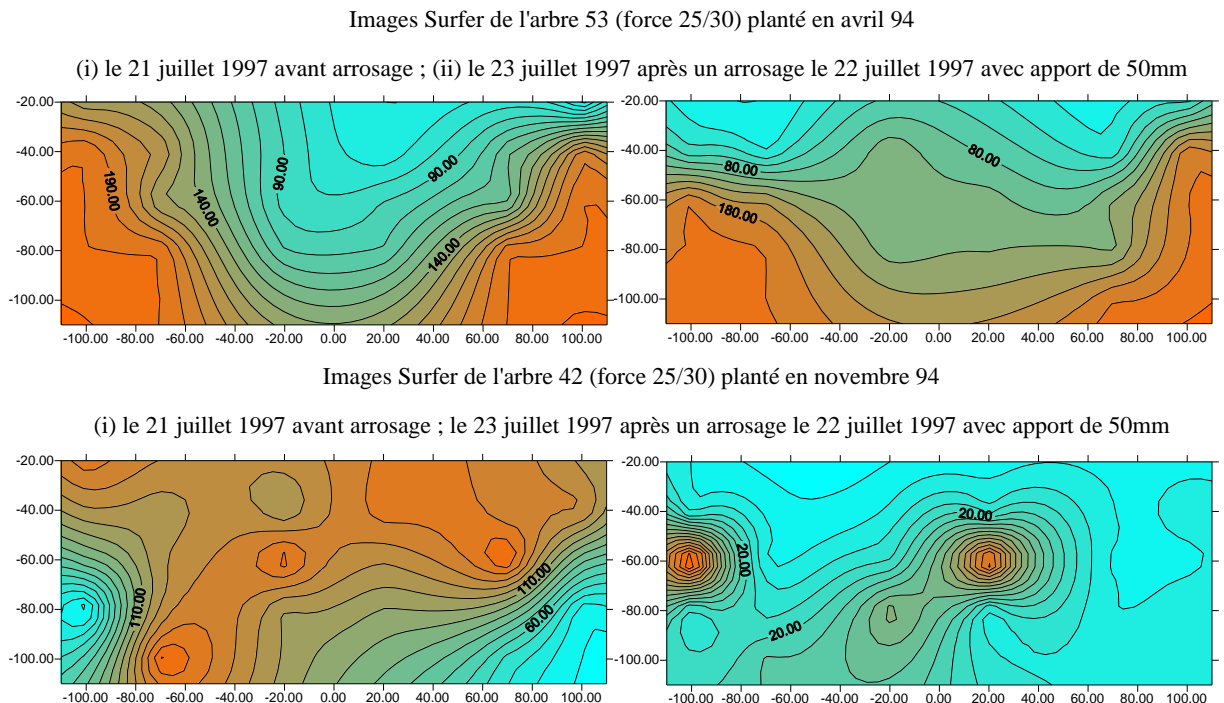


Figure 15 : Effet des irrigations selon la date de plantation, évolution de l'état d'humidité () de la fosse*

(*) : Chaque ligne correspond à une courbe isopotentielle exprimant en valeur absolue la tension en cbars. (rouge = sec, bleu = humide)

Les différences de réponses tensiométriques selon la date de plantation sont à mettre en relation avec les résultats d j   obtenus sur ces arbres. Le suivi réalisé en 1995 (mémoires de A. Maarouf et J. Filoque) et en 1996 (mémoire A. Delcambre) a montré que pour les arbres plantés en avril 94, la colonisation de la fosse par les racines s'est faite plus rapidement et de façon plus homogène que pour ceux plantés en novembre 1994. Cette différence est liée tout simplement au fait que les arbres plantés en avril 1994 ont une saison de végétation supplémentaire sur le site que ceux plantés en novembre 1994.

Les frênes plantés au printemps 1994 épuisent plus rapidement les ressources en eau de la fosse. Les conditions de plantation de la CIL semblent exposer ces arbres à des stress relativement intenses. Les zones de dessèchement étant proches du remblai extrêmement drainant, les déficits hydriques auraient été moins forts si le volume de la fosse avait été plus important (rappel : 6m³ par fosse).

IV.3.2 Effets des irrigations selon la force de plantation

L' tat d'humidité de la fosse de plantation des arbres de forces 10/15, 15/20 et 20/25 est donné par rapport aux interventions d'arrosage (Figure 16):

- 19 juin; un jour avant l'arrosage (  gauche sur la figure),
- 7 août, 2 jours après l'arrosage (  droite sur la figure).

Les résultats tensiométriques représentés par Surfer font apparaître peu de différence de profils hydriques entre les forces à la plantation 10/15 et 15/20 au niveau du dessèchement et de la réhumectation du sol.

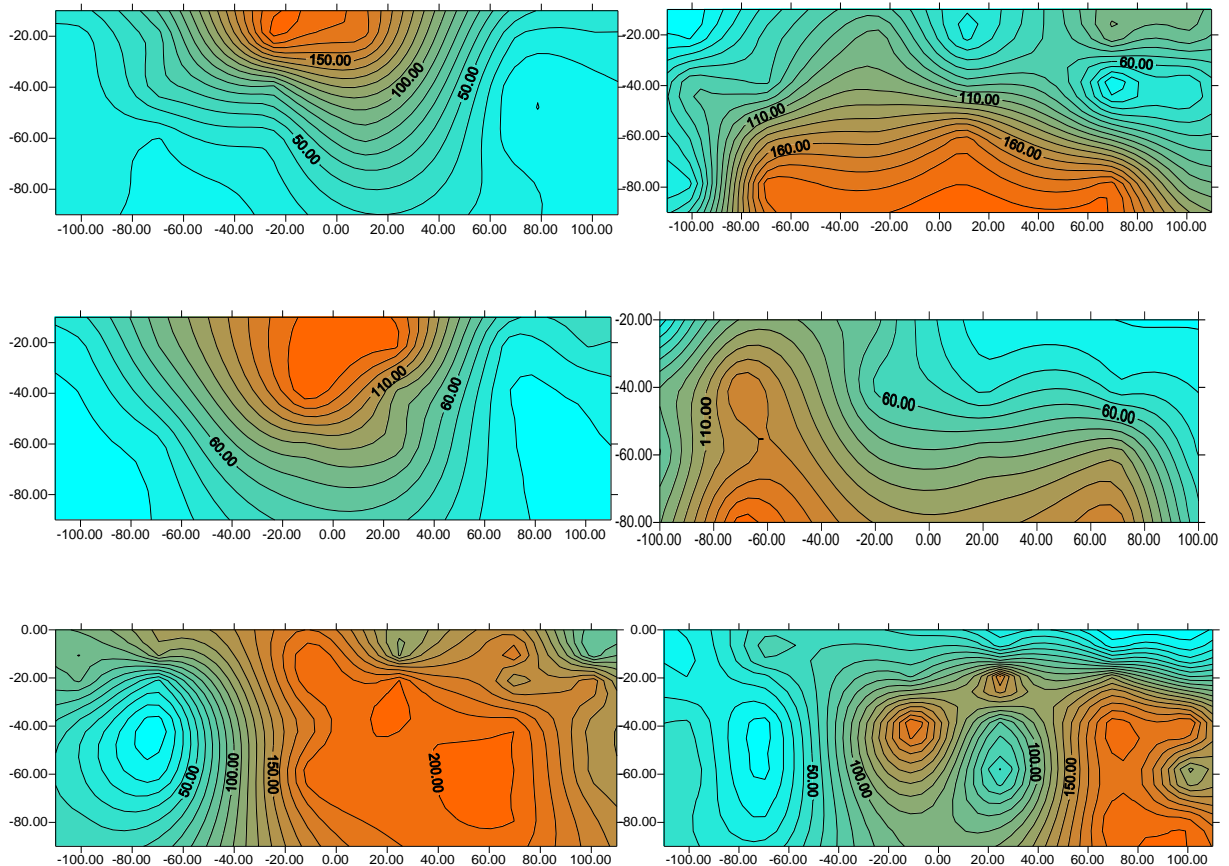


Figure 16 : Etat d'humidité des fosses selon la force à la plantation, pour des arbres de 3 forces différentes : 10/15 (haut), 15/20 (milieu), (20/25 (bas)

Pour l'arbre de force 20/25, le dessèchement ne concerne qu'un côté de la fosse. L'existence de cette dissymétrie rend difficile la réhumectation de l'ensemble du profil car les apports sont épandus sur toute la surface.

A travers ces résultats, il apparaître que la force de plantation a un effet sur la vitesse de colonisation racinaire : les gros sujets (20/25)  puisent plus rapidement les ressources en eau de la fosse. Leurs besoins en eau semblent plus importants et doivent être bien contrôlés pour leur éviter des situations de stress hydrique.

Il faudrait donc envisager des doses d'eau plus élevées pour des forces de plantation croissantes.

V. Applications à la conduite de l'arrosage

V.1.1 Etude des corrélations entre les différents paramètres

V.1.1.1 Entre le potentiel hydrique moyen du sol et le potentiel hydrique foliaire de base

En théorie, la valeur du potentiel hydrique foliaire au lever du jour doit être proche voire identique à celle du potentiel hydrique du sol.

Pour vérifier cette relation, un potentiel hydrique moyen du sol est déterminé. Sachant que les valeurs tensiométriques varient en fonction de la localisation des sondes, le potentiel hydrique moyen est approché par le calcul de la moyenne des tensions qui varient le plus dans le temps. Il correspond à la somme des valeurs enregistrées par les sondes retenues rapportés au nombre de sondes.

Dans le cas d'un dessèchement progressif du sol, les variations du potentiel hydrique moyen du sol et du potentiel hydrique foliaire de base sont concomitantes. Toute diminution de celui du sol se traduit également par une diminution de celui de l'arbre. Cette relation est exprimée par un coefficient de régression voisin de 93% (Figure 17).

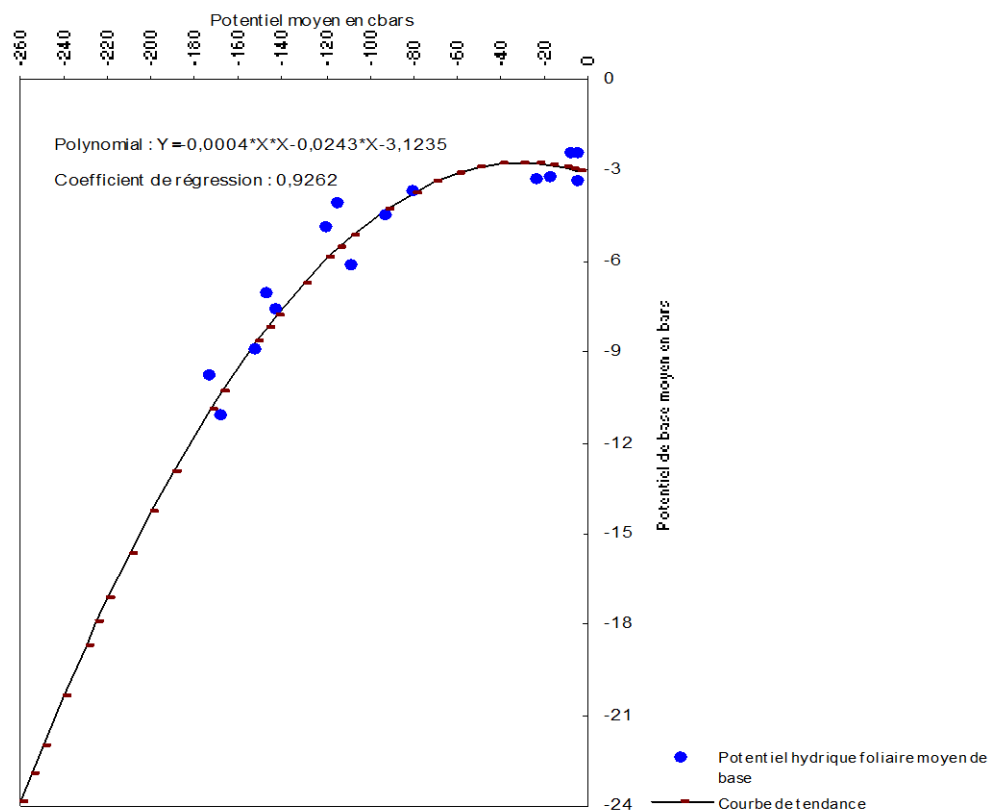


Figure 17 : Corrélation entre le potentiel hydrique moyen du sol et le potentiel de base

Dans le cas d'un dessèchement important du sol, la relation entre les deux potentiels est moins évidente. Lorsque le potentiel hydrique du sol atteint la limite de lecture des sondes (-200 cbars), le potentiel hydrique foliaire de base poursuit sa chute. L'assèchement très important du sol n'étant pas quantifiable, il n'est pas possible

d'interpréter l'évolution du potentiel de base par le potentiel moyen du sol pour des stress hydriques sévères.

Dans le cas d'un cycle de dessèchement et de réhumectation du sol, la comparaison des potentiels moyens du sol et foliaires de base donne une indication sur l'aptitude du Frêne d'Amérique à ajuster son potentiel hydrique interne par rapport à la baisse de celui du sol. L'arbre semble tolérer une contrainte hydrique moyenne en maintenant un état hydrique interne nécessaire à sa croissance. La valeur seuil au delà de laquelle cette tolérance s'exprime difficilement est déterminée par un potentiel moyen dans le sol, voisin de -100 cbars.

V.1.1.2 Entre potentiel hydrique moyen du sol et dynamique de croissance

Globalement, l'évolution des amplitudes de contraction maximale (exprimées en micromètre) est comparable entre les rameaux de la flèche et de la charpentière de référence. Les valeurs les plus faibles sont obtenues lorsque le potentiel hydrique moyen du sol est compris entre -5 et -20 cbars. La croissance est alors normale.

Lorsque le potentiel hydrique moyen dans le sol atteint des valeurs inférieures (supérieure en valeur absolue), la disponibilité en eau pour l'arbre est fortement réduite. Elle se traduit par une augmentation importante des amplitudes de contraction et une décroissance des diamètres des rameaux de l'arbre. Cependant, la relation entre les deux paramètres n'apparaît pas clairement (Figure 18).

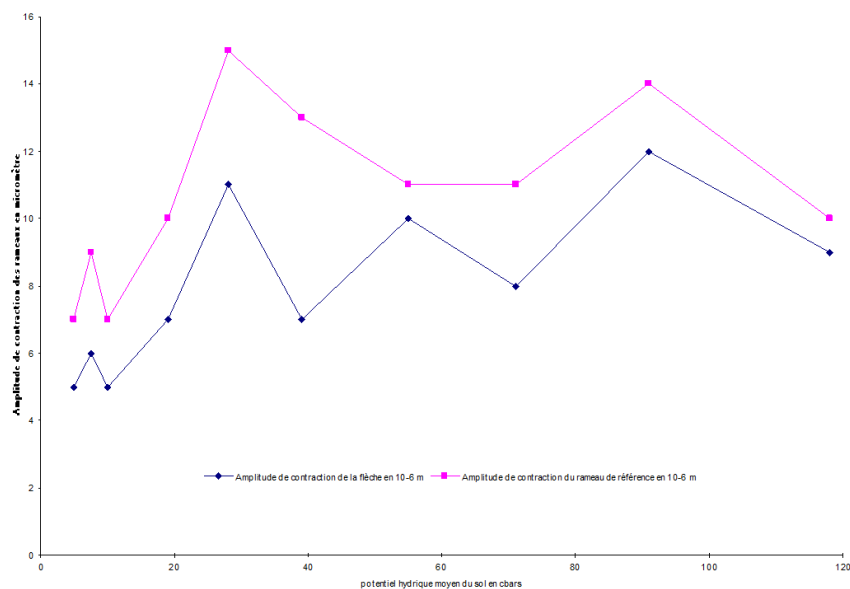


Figure 18 : Corrélation entre le potentiel hydrique moyen du sol et l'amplitude des contractions

V.1.1.3 Entre potentiel hydrique foliaire de base et dynamique de croissance

La recherche d'une relation entre le potentiel de base et l'amplitude de contraction des rameaux de l'arbre a été menée sur le frêne 44 transplanté en novembre 1994 et le frêne 52 transplanté en avril 1994 et concerne uniquement la période du 19 juillet au 14 août 1996.

L'analyse de tous les résultats indique que sur la période étudiée il n'y aurait de corrélation significative entre le potentiel de base et les variations d'amplitude de contraction qu'à partir d'un potentiel de base de 4 bars (Figure 19). Le potentiel de base semble évoluer surtout en fonction des potentiels du sol tandis que l'amplitude de contraction serait sensible aux variations d'humidité de l'atmosphère.

Il aurait été intéressant d'obtenir des valeurs de potentiel de base lors d'une période de croissance continue c'est à dire pour une courbe qui présenterait une tendance générale à la croissance des rameaux avec augmentation progressive des contractions journalières au fur et à mesure du dessèchement du sol.

Cependant, le frêne semble tolérer un assèchement progressif du sol en maintenant un état hydrique interne favorable à sa croissance générale. Les signes de décroissance en diamètre apparaissent pour des potentiels de base situés entre -3,67 et -5.55 bars.

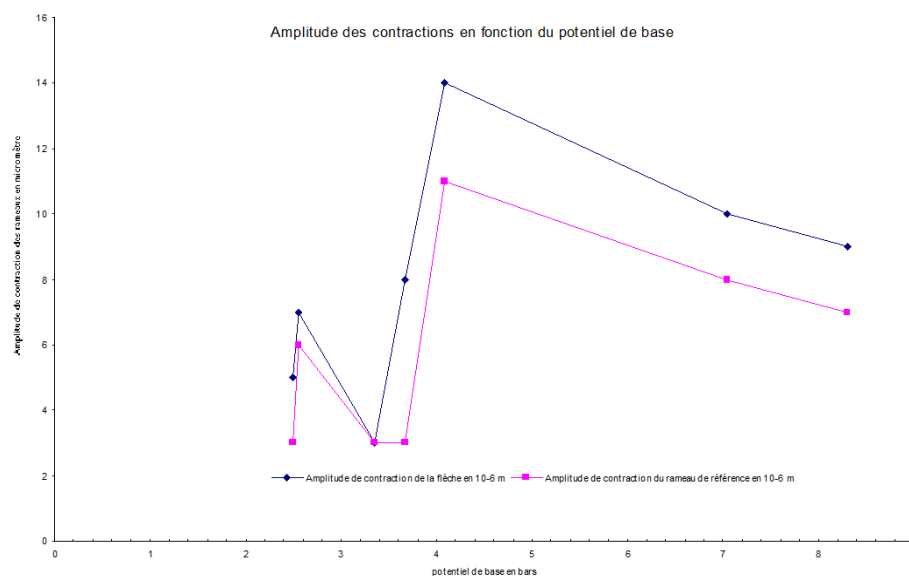


Figure 19 : Corrélation entre le potentiel hydrique moyen de base et l'amplitude des contractions

V.1.1.4 Entre le potentiel hydrique du sol et l'état de l'enracinement

L' tat de développement racinaire peut être appréhendé par l'évolution des potentiels hydriques du sol. La relation entre les variations tensiométriques et la progression du front racinaire a été vérifiée par des excavations racinaires.

Les frênes plantés en avril 1994 dont les valeurs tensiométriques ont été faibles (ou élevées en valeur absolue) ont développé un système racinaire plus important que ceux plantés en novembre 1994 ayant enregistré des amplitudes tensiométriques plus faibles. La colonisation de la fosse par les racines des frênes d'avril 1994 s'est faite de façon homogène sur au moins 1 mètre d'éloignement par rapport au tronc. Pour les frênes de novembre 1994, le système racinaire est resté relativement proche de la motte au niveau des horizons supérieurs.

V.1.2 Applications au suivi de l'arrosage et de l'enracinement

L'existence de corrélations significatives entre les différents paramètres étudiés et le potentiel hydrique du sol démontre la fiabilité du suivi tensiométrique.

Préférer la tensiométrie aux autres méthodes ayant montré une bonne corrélation s'explique aussi par les aspects pratiques suivants :

- La mesure du potentiel hydrique foliaire en routine n'est pas possible, du fait de l'heure et du temps nécessaire de la mesure
- La mesure des variations micrométriques repose sur matériel fragile, plus visible et donc sujet à vandalisme que les dispositifs tensiométriques enterrés.

Pour revenir à la tensiométrie, l'un des bénéfices pratiques de cet outil est le pilotage de l'arrosage. Il permet à la fois de suivre l'état hydrique du sol et d'apprécier l'aptitude des arbres à supporter la contrainte hydrique de par la relation mise en évidence entre le potentiel du sol et le potentiel hydrique foliaire de base. La progression de la colonisation racinaire peut également être appréhendée si le dispositif tensiométrique prévoit une répartition appropriée des sondes. Pour les arbres plantés en 1994, les sondes placées plus en profondeur (1mètre ou en fond de fosse) ont donné en 1997 plus d'indications sur la croissance racinaire dans les horizons profonds, plus particulièrement dans le remblai.

Pendant la période de reprise racinaire de l'arbre après transplantation, il est difficile d'établir une valeur tensiométrique seuil au-delà de laquelle l'apport d'eau par arrosage est nécessaire. Seule l'analyse des variations tensiométriques dans le temps et dans l'espace permet le contrôle et le suivi des besoins en eau : inciter les racines à progresser dans la fosse de plantation pour y chercher l'eau disponible et ne décider de l'arrosage que quand cette réserve hydrique est épuisée.

La relation établie entre les valeurs tensiométriques et la micromorphométrie rend compte de l'état de croissance des arbres selon les différents régimes hydriques. Cependant, pour consolider cette corrélation des mesures de croissance de la partie aérienne, notamment, la longueur des pousses de chaque année, auraient été nécessaires.

VI. Conclusion et perspectives

Les résultats des quatre années d'études (1994 à 1997) des paramètres relatifs à l'état hydrique du sol et de l'arbre ont confirmé l'importance des transferts hydriques pour la reprise des arbres transplantés. Des corrélations significatives entre les différents paramètres étudiés sont mises en évidence. La détermination du potentiel hydrique du sol par sondes tensiométriques s'avère un critère représentatif de l'état hydrique du sol et de l'arbre. La relation établie entre le potentiel hydrique du sol et la micromorphométrie a permis de rendre compte de l'état de croissance des arbres selon les différents régimes hydriques. Les résultats obtenus par radiothermométrie ne sont pas concluants. La méthode semble difficile à mettre en œuvre car la prise de mesure dépend principalement des conditions extérieures (rayonnement, vitesse du vent, etc.).

L'une des conséquences pratiques de l'usage de la tensiométrie est la maîtrise de l'arrosage et l'évaluation indirecte de la dynamique d'enracinement. Il est ainsi rendu possible de décider de l'arrosage que lorsque la réserve utile en eau arrive à épuisement, pour inciter les racines à progresser en fosse à la recherche de l'eau disponible.

Des suivis de l'état hydrique des arbres ressortent les résultats et préconisations marquants suivants. Pour des arbres de forces de plantations croissantes, il faut mettre en œuvre des doses d'eau plus importantes et plus fréquentes : l'épuisement des réserves en eau dans la fosse est plus rapide. L'augmentation des volumes de fosses de plantation est de rigueur pour des essences d'arbres de grand gabarit (ou choisir essences de plus petit gabarit) : exemple ici des frênes d'Amérique plantés en fosses de 6 m³ environnées d'un remblai extrêmement drainant.

Grâce à ces résultats de caractérisation initiale, le suivi hydrique des arbres par la méthode tensiométrique a connu un développement important qui tend, aujourd'hui à se généraliser. La phase expérimentale de Sciencil s'est poursuivie par des avancées technologiques ayant permis de simplifier la mise en œuvre du matériel et d'automatiser le recueil des données et leur interprétation.

Depuis cette époque, d'autres outils de mesure de l'eau du sol ont été développés et appliqués essentiellement à la production agricole. Il s'agit des sondes capacitatives qui mesurent une teneur en eau et non sa force de liaison avec le sol (indépendant du type de sol). Les limites d'utilisation de ces sondes en aménagements paysagers et en particulier pour les arbres résident dans leur coût élevé et dans la difficulté d'interprétation des mesures qui évoluent selon le contexte agro-pédologique des plantations urbaines. Il s'agit également du capteur PepiPiaf développé par l'unité PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand, qui semblerait moins fragile et sujet à vandalisme que les capteurs de type Pepista. Une veille sur l'évolution des outils de mesure et leur performance est à réaliser.

L'acquisition de connaissances supplémentaires concernant les autres paramètres hydriques a connu peu d'évolution depuis la fin de cette phase de Sciencil. Néanmoins, certaines recherches et expérimentations ont été poursuivies soit pour mettre au point de nouveaux outils de mesures hydriques, notamment le potentiel hydrique de base et les variations micromorphométriques (Unité PIAF-INRA de Clermont-Ferrand), soit pour

caractériser le bilan hydrique sur de jeunes plantations (Laboratoire Sciences des Sols – Agrocampus Ouest), ou encore pour étudier l’effet du positionnement du drain d’arrosage sur la reprise des arbres (Ville de Paris).

La validation scientifique et la valorisation des résultats de ces travaux peuvent constituer un nouveau départ de Sciencil.

VII. Références bibliographiques

- BORDES P. - 1993 - Les relations hydriques sol-plante-climat et leurs applications en irrigation. Ligne verte, septembre 1993, n°1, pp 21-28.
- CRUIZIAT P., TYREE M.T. - 1990 - La montée de la sève dans les arbres. La recherche, 21, (220), pp 406-414.
- DELCAMBRE A. - 1996 - Les plantations des espaces verts de la cité internationale de Lyon - Suivi et contrôle des conditions hydriques des anthroposols reconstitués et de l'alimentation hydrique après transplantation de gros sujets. Mémoire de fin d'études ENITHP, 52 p +annexes.
- FILOQUE J. - 1995 - Les plantations des espaces verts de la cité internationale de Lyon - Définition d'outils pour caractériser la crise de transplantation. Mémoire de fin d'études ENITHP, 51 p + annexes.
- MAAROUF A. - 1995 - Les plantations des espaces verts de la cité internationale de Lyon - Essai de caractérisation du fonctionnement de l'alimentation hydrique des arbres après transplantation. Mémoire de fin d'études ENITHP, 46 p + annexes.
- MAAROUF A., ROSSIGNOL J.P. - 1996 - L'alimentation hydrique des arbres après transplantation. Paysages actualités, septembre 1996.
- MADELAINE O. - 1997 - Les transferts hydriques du sol à l'arbre. Mémoire de fin d'études ENITHP, 53 p + annexes.